

升船机关键技术研究与发展综述

钮新强, 王蒂*, 廖乐康, 王可, 徐利福

(长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 升船机凭借适应水头高、过坝时间短、节能不耗水、布置更灵活的显著优势, 已逐渐成为现代内河航运与水利枢纽工程克服航道集中水位落差的关键通航设施。本文系统梳理升船机技术的发展历程与体系架构, 重点剖析三大主流升船机的技术原理与工程适配性; 聚焦具有广泛适用性和大型化发展潜力的平衡重式垂直升船机(齿轮齿条爬升式、钢丝绳卷扬式)的结构设计、施工制造、安全保障等核心领域, 结合三峡、构皮滩、百色等典型工程案例, 阐述中国在超大型升船机领域的关键技术突破; 针对超大运量、智慧运维、绿色低碳等行业需求, 展望串联矩阵式布局、摩擦驱动式机型、智能监测诊断三大技术发展趋势。研究表明, 中国升船机技术已实现从“跟跑引进”到“领跑创新”的跨越式发展, 构建了多技术路线并行的自主体系, 未来将为国家综合立体交通网建设与“一带一路”倡议提供关键装备支撑, 推动全球内河航运技术升级。

关键词: 航道工程; 平衡重式垂直升船机; 结构设计; 施工制造; 安全保障; 智能监测; 技术发展趋势

中图分类号: U642 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-4653.2026.02.001

Research and development overview of key technologies for shiplift

Niu Xinqiang, Wang Di*, Liao Lekang, Wang Ke, Xu Lifu

(Changjiang Survey Planning Design and Research Co. Ltd, Wuhan 430010, China)

Abstract: With its prominent advantages of adapting to high water heads, shortening dam-passing time, saving energy without water consumption, and enabling flexible layout, the shiplift has gradually become a key navigation facility for overcoming concentrated water level drops in modern inland waterway navigation and water conservancy hub projects. This paper reviews the development history and system architecture of shiplift technology, focusing on analyzing the technical principles and engineering applicability of three mainstream shiplift types systematically. It concentrates on the structural design, construction manufacturing, and safety assurance of counterweight vertical shiplift (including rack and pinion vertical and wire rope hoist types)—which possess broad applicability and potential for large-scale development. Combined with typical projects like Three Gorges, Goupitang, and Baise shiplift, it details China's breakthroughs in ultra-large shiplift technologies. Addressing industry demands for ultra-high capacity, intelligent operation and maintenance, and green low-carbon solutions, this section projects three major technological trends: series-matrix layout, friction driven models, and intelligent monitoring and diagnostics. Research indicates that China's shiplift technology has achieved leapfrog development, transitioning from “following and introducing” to “leading and innovating.” It has established an independent system featuring multiple parallel technical routes. In the future, this technology will provide critical equipment support for the construction of the national comprehensive three-dimensional transportation network and the Belt and Road Initiative, driving the technological advancement of global inland waterway shipping.

Key words: waterway engineering; counterweight vertical shiplift; structural design; construction and manufacturing; safety guarantee; intelligent monitoring; technology development trend

收稿日期:2026-03-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0402000)资助

作者简介:钮新强(1962—),男,正高级工程师,中国工程院院士,研究方向为水利与交通工程规划设计。*通信作者:401631943@qq.com

引用格式:钮新强,王蒂,廖乐康,等.升船机关键技术研究与发展综述[J].中国航海,2026,49(2):1-14.

Niu X Q, Wang D, Liao L K, et al. Research and development overview of key technologies for shiplift[J]. Navigation of China, 2026, 49(2):1-14. (in Chinese)

内河航运作为绿色低碳的运输方式,在综合交通运输体系中占据不可替代的战略地位,而水位落差引发的通航瓶颈,始终是制约高等级航道网络贯通的核心难题。升船机作为克服航道集中水位落差的核心通航建筑物,主要通过机械装置实现船舶垂直或斜向升降,其技术优势显著^[1-2]:1)水头适应性强,已建升船机单级最大提升高度达127 m,组合式升船机突破199 m,远超船闸适应能力;2)运行效率高,船舶通过三峡升船机平均耗时约40 min,仅为双线五级船闸的1/5,大幅提升通航效能;3)节能效益突出,运行过程不消耗水资源,应用于高坝枢纽可增效发电,应用于运河工程可稳定航道水位;4)地形适配灵活,对高水头、复杂水力学及地形地质条件的适应性优于船闸。

随着《国家综合立体交通网规划纲要》《内河航运发展纲要(2021—2035年)》等政策的持续推进,以及“双碳”目标对航运绿色转型的要求升级,补齐内河航运基础设施短板、推动内河水运高质量发展成为新时代内河水运发展的方向,而建设大型通航建筑物是畅通内河航运、提高航道等级、促进内河水运发展的关键举措,升船机将成为高坝枢纽通航的关键解决方案。

从技术演进视角看,升船机已完成从手动控制到智能运行、从单一技术引进到多路线自主创新的跨越式发展。中国仅用二十余年时间,便构建起齿轮齿条爬升式、钢丝绳卷扬式、水力驱动式三大技术体系,建成全球规模最大、技术最先进的升船机集群,其中作为平衡重式垂直升船机的核心类型,齿轮齿条式和钢丝绳卷扬式因具备广泛适用性和大型化发展潜力,工程实践成果尤为突出:三峡升船机以113 m提升高度、15 500 t提升质量成为垂直升船机领域的世界典范;被誉为“升船机博物馆”的构皮滩升船机,以199 m通航水头刷新世界纪录;百色升船机创新性采用平衡摩擦卷筒技术,攻克了钢丝绳卷扬式垂直升船机的水漏空事故设防难题,并实现主提升系统的优化布置。本文立足国内外升船机技术发展历程与工程实践经验,系统梳理平衡重式垂直升船机的发展阶段,深入剖析其核心技术突破方向与当前应用现状,进一步预判未来技术演进路径,为内河航运现代化建设与水利枢纽通航技术升级提供理论与实践参考。

1 升船机技术发展历程与体系

1.1 发展历程演进^[3]

升船机技术的雏形可追溯至公元前600年古希

腊的科林斯航行滑道,作为原始斜面升船机,其技术理念在古埃及、北欧及中国缓慢传承,驱动方式以人力、畜力为主,结构为木制简易框架,尚未形成工程化应用。

工业革命推动升船机技术实现质变:18世纪60年代英国“运河狂热”催生高效通航需求,1788年英国开特里斜面干运升船机建成,首次实现机械化运作,标志技术从“原始工具”迈入“工程设备”阶段。此时期的技术突破集中于平衡系统初步应用——通过滑轮与配重块降低提升功率,但受材料与动力技术限制,提升高度最大仅15 m,过船不足100 t,且以斜面式为主。

19世纪至20世纪初,垂直升船机技术萌芽并逐步成熟:1777年英国学者伊拉斯谟斯·达尔文提出平衡式注水沉箱设计构想;1835年英国大西运河水力驱动升船机建成,成为首个非试验性现代化通航设施;1934年德国尼德芬诺垂直升船机确立全平衡齿轮垂直驱动技术路径,大幅提升扬程与吨位,奠定了现代升船机基本架构。

中国升船机技术虽起步晚,但形成独立的本土化脉络:20世纪50年代起,基于内河航运与水利建设需求,中国启动通航建筑物技术探索,受材料工艺与控制技术限制,长期处于试验阶段;1966年安徽寿县斜面升船机(30 t级)建成,标志技术从理论落地工程实践;1973年丹江口水电站150 t级垂直+斜面组合式升船机建成,成为我国首座中型升船机。

20世纪90年代至今,中国升船机技术进入跨越式发展期。伴随现代化建设与流域水电梯级开发,我国先后建成岩滩、水口、隔河岩、构皮滩、三峡、向家坝等十余座大中型升船机,涵盖垂直与斜面类型,覆盖钢丝绳卷扬式、齿轮齿条爬升式、水力驱动式等多种形式,实现从“引进吸收”到“自主创新”的跨越,建成全球规模最大的升船机集群。

为直观对比国内外经典升船机的技术特点与工程规模,清晰展现不同时期、不同国家升船机的技术迭代与发展水平,现将国内外代表性升船机的关键特征参数整理如表1所示。

1.2 技术体系与特征

在升船机技术的长期发展与工程实践中,已形成三大主流技术体系——齿轮齿条爬升式、钢丝绳卷扬式和水力驱动式。三者基于不同运行原理与结构设计,在性能表现、适用场景上各有侧重,适配不同的水力枢纽通航需求,具体特征如下。

1) 齿轮齿条爬升式^[4-6]

其核心运行原理围绕“刚性传动+平衡重+安

表1 国内外代表性升船机关键特征参数
 Tab.1 Key characteristic parameters of typical shiplifts in China and abroad

序号	国家/地址	河流名称	升船机型式	船厢有效水域 (长×宽×水深)/m	过船规模/ 吨级	提升高度/ m	建成年份/ 年
1	德国/老尼德芬诺	哈芬-奥德水道	链轮链梯爬升式全平衡垂直升船机	85×12×2.5	1 000	36	1934
2	德国/新亨利兴堡	多特蒙特-埃姆斯	浮筒式全平衡垂直升船机	90×12×3	1 350	14.5	1962
3	德国/吕内堡	易北河支运河	齿轮齿条爬升式全平衡垂直升船机	100×12×3.5	1 350	38	1975
4	比利时/斯特勒比	中央运河	钢丝绳卷扬式全平衡垂直升船机	112×12×4.15	2 000	73	1988
5	中国/岩滩	红水河	钢丝绳卷扬下水式垂直升船机	40×10.8×1.8	250	68.5	2000
6	中国/水口	闽江	钢丝绳卷扬式全平衡垂直升船机	114×12×2.5	2×500	59	2005
7	中国/隔河岩一/二级	清江	钢丝绳卷扬式全平衡垂直升船机	42×10.2×1.7	300	42/82	2008
8	中国/彭水	乌江	钢丝绳卷扬式全平衡垂直升船机	59×11.7×2.5	500	66.6	2016
9	中国/景洪	澜沧江	水力驱动式全平衡垂直升船机	53×12×2	300	66.42	2016
10	中国/三峡	长江	齿轮齿条爬升式全平衡垂直升船机	120×18×3.5	3 000	113	2017
11	中国/丹江口(新)	汉江	钢丝绳卷扬提升移动式垂直升船机	28×10.2×1.4	300	62	2017
12	中国/向家坝	金沙江	齿轮齿条爬升式全平衡垂直升船机	116×12×3	1 000	114.2	2018
13	中国/亭子口	嘉陵江	钢丝绳卷扬提升式全平衡垂直升船机	118×12×2.5	2×500	84.5	2019
14	中国/构皮滩	乌江	一、三级钢丝绳卷扬提升下水式/二级全平衡垂直升船机	59×11.7×2.5	500	47/79/127	2021
15	中国/百色	右江	采用平衡摩擦卷筒的钢丝绳卷扬式全平衡垂直升船机	130×12×3.9	1 000	88.8	在建

全自锁”构建:①通过驱动机构齿轮与齿条啮合,驱动承船厢垂直升降;②配置与承船厢及设计水深总重相等的平衡重系统,大幅降低驱动功率以及驱动设备规模;③针对水漏空、船厢室进水、厢内沉船等

失衡事故,设自锁安全机构,保障承船厢失衡工况安全。

关键结构特征凸显“刚性稳定+安全冗余”:承船厢升降过程刚性支承,保证运行平稳性与高精度

度;承船厢竖向支承可根据正常升降、对接及失衡事故工况灵活转化,安全保障性突出;机械设备需适应塔柱结构与承船厢之间的相对变位。该类型升船机适用于超高水头、超大吨位通航需求,尤其适配对运行效率与安全可靠性要求极高的大型水利枢纽。

典型案例:长江三峡升船机,最大提升高度 113 m,过船规模 3 000 t 级,为目前全球规模最大的齿轮齿条爬升式升船机。其创新采用的“齿轮齿条驱动+长螺母-短螺杆安全制动”技术,为高水头垂直升船机的设计与建设树立了行业标杆。

2) 钢丝绳卷扬式^[7-8]

以“柔性悬吊+卷扬驱动+平衡重”为核心运行原理:①多组钢丝绳一端悬吊承船厢,另一端绕过卷扬机卷筒与平衡重块连接,电机驱动卷筒正反转实现承船厢升降;②根据设计类型,承船厢不下水全平衡式通过平衡重与承船厢质量完全匹配降低驱动力矩,下水部分平衡式根据主提升机的疲劳强度优化原则确定平衡重质量;③连接承船厢的提升钢丝绳末端设置张力均衡装置,便于调整承船厢初始水平度,并确保各钢丝绳受力均衡。

关键结构特征凸显“柔性适配+经济实用”:承船厢通过钢丝绳柔性支承,可适应其与塔柱结构的相对变位,降低塔柱结构的施工和机械设备的制造精度要求;承船厢的纵倾稳定性与主提升机的布置方案密切相关;需重点攻克水漏空事故设防难题,提升极端工况的应对能力。该类型结构相对简单、建设成本较低,且对塔柱和承船厢变形适应性强,对较高水头、大中型通航场景具有较为广泛的适用性。

典型案例:构皮滩升船机,通航水头 199 m,过船规模 500 吨级,采用三级升船机组合设计(第一、三级为承船厢下水部分平衡式,第二级为不下水全平衡式),是复杂高水头场景下钢丝绳卷扬式技术的典范,首次将升船机应用提升至 200 m 级高水头。

3) 水力驱动式^[9-10]

核心运行原理立足于“浮筒浮力驱动+自平衡调节”:以浮筒浮力替代电动机作为核心驱动力,浮筒置于专用竖井内,竖井与输水系统连通;当输水管道向竖井充水时,浮筒受浮力上升,通过传动结构牵拉承船厢下降至与下游水位;竖井泄水时,浮筒随水位下降,带动承船厢上行至与上游水位;承船厢内船舶载重发生变化时,浮筒可自动调整其在竖井中的淹没水深,维持系统全平衡状态,保障平稳运行。

关键结构特征凸显“浮力驱动+系统协同”:主提升系统由浮筒、钢丝绳、卷筒、同步轴等组成,浮筒与承船厢通过钢丝绳联动,同步轴搭配膜片联轴器

消除传动间隙,卷筒制动器及扭矩监测系统保障安全,同时配备夹紧、顶紧及导向装置,确保对接密封与运行稳定;水力驱动输水系统含压力钢管、充泄水阀门、浮筒竖井及水位流量检测装置,通过对称三通结构与水平连通管设计消除竖井水位偏差,强制补气系统稳定充泄水过程。该类型结构稳定性强、无需电力拖动、经济性突出,适用于下游水位变幅大、变化快,具备坝前取水条件的水电站通航工程。

典型案例:景洪升船机,最大提升高度 67.2 m,过船规模 300 t 级,为我国首创的水力浮动转矩平衡式升船机,采用全平衡设计且承船厢可直接入水,凭借独特的浮筒自平衡设计、封闭环形同步轴系统及复杂输水系统,成为水力驱动式技术的代表性工程。

基于上述三大主流技术体系的特征差异,结合当前工程实践中的核心需求与技术攻关重点,下文聚焦以齿轮齿条爬升式和钢丝绳卷扬式为代表的平衡重式垂直升船机,深入探讨其核心技术突破与未来发展趋势。

2 核心技术研究进展与关键突破

2.1 结构设计技术与突破

升船机结构设计需统筹考虑运行稳定性、极端工况适应性与复杂环境适配性,核心技术攻关聚焦水位适应、结构承载、变形协调、事故设防等关键维度,具体技术突破如下。

1) 百米级高扬程重载单级升船机结构体系

三峡水利枢纽升船机工程单级提升高度 113 m、过船规模 3 000 t 级,面临大流量泄洪、大负荷调峰引发的闸首 30 m 大水位变幅、0.5 m/h 快水位变率等复杂通航条件,以及大吨位船舶重载适配的技术挑战。针对此难题,创新提出“新型闸首结构+闸首对接设备+复合型重载高耸薄壁塔柱”总体结构体系,如图 1 所示。

新型闸首结构^[11-12]:上闸首兼顾挡水与通航双重功能,采用“预应力整体坞式”设计,底板布设预应力锚索,设置 2 条纵向、3 条横向施工缝,分 4 段 12 块分层浇筑,待块体温度稳定后实施接缝灌浆与宽槽回填,有效降低施工期温度应力,避免裂缝产生。

闸首对接设备^[13-14]:研发的适应上游 30 m 水位变幅的“卧倒门过船、平板门对接、叠梁门调位”特大型组合门,通过提升式平板门与承船厢密封框对接、卧倒小门启闭形成过船通道、叠梁门组合调整门位,解决了高水头、大变幅挡水条件下的通航过船

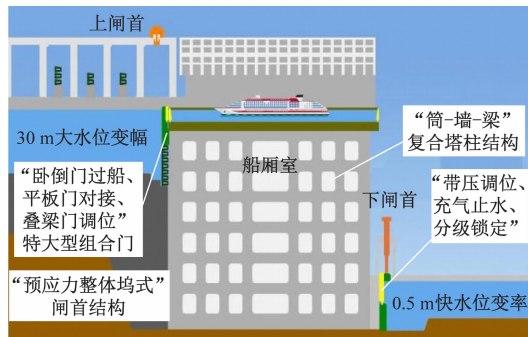
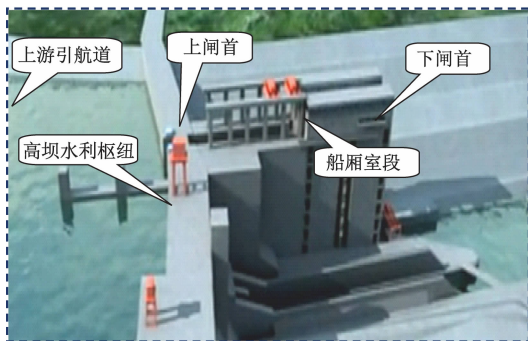


图1 重载高扬程单级升船机结构体系

Fig. 1 Structural system of heavy-load high-lift single-stage shiplift

难题;研发的适应下游 11.8 m 水位变幅、 ± 0.5 m/h 水位变率的“带压调位、充气止水、分级锁定”特大型双扉平板门,以压缩空气为介质的充压止水技术破解大门频繁带压调位导致的止水橡皮磨损难题,以“摆臂式”分级锁定装置解决大门挡水状态的安全锁定难题。

复合型塔柱结构^[15-16]:146 m 高承重塔柱承受 $2 \times 155\ 000$ kN 的偏心荷载,且需满足设备运行的严格变形要求,具有高度大、承载力大、变形小的特点。研发的“筒-墙-梁”复合塔柱结构对称布置于船厢室两侧,顶部由 7 根横梁及平台连接成整体空间结构。有限元分析与现场监测表明,最大横向相对变位 33 mm、纵向 15 mm,既满足断面尺寸受限条件下的结构承载安全与控制变形要求,又实现工程量的集约优化。

该结构体系成功破解了 3 000 t 级船舶快速翻越百米级高坝的技术难题,为世界规模最大、技术难度最高升船机的建成提供了核心结构支撑。

2) 200 m 级超高扬程组合式升船机结构体系

构皮滩水电站通航工程(199 m 通航水头)面临高山峡谷地形地质条件、坝下河势复杂、通航水头高、上游水位变幅大、下游水位变率快及已建拱坝枢纽制约的多重技术挑战。针对此类难题,创新提出“多级升船机+隧洞+渡槽+明渠”新型组合式大型超高扬程升船机工程结构体系^[2,17](如图 2 所示):通过设置多座垂直升船机对通航总水头进行合理分级,有效降低单级设备的工程技术难度;各级升船机之间采用隧洞、渡槽、明渠等航道型式过渡衔接,逢山开洞、逢沟架槽,通航线路布置灵活,可充分适应地形、地质及河势条件,大幅减少山体开挖与高陡边坡风险,首次将通航设施的适应水头提升至 200 m 级,为复杂高水头水利枢纽的通航难题提供了开创性技术路径。

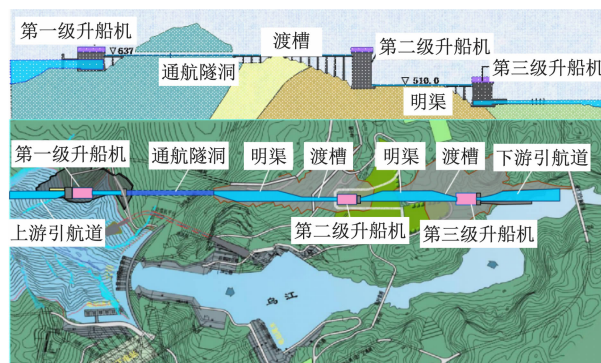


图2 200 m 级超高扬程组合式升船机结构体系

Fig. 2 Structural system of 200 m-level ultra-high lift combined shiplift

3) 机械设备与塔柱结构变形协调技术

在超大型齿轮齿条爬升式升船机中,承船厢升降依赖驱动系统齿轮与齿条的全行程精准啮合,可齿条安装于超百米的混凝土塔柱上,受制造安装误差及塔柱变形影响,极易产生横向、纵向、扭转等多维度变位,导致齿轮与齿条啮合状态不良,成为制约该型式升船机可靠运行的核心技术矛盾。

针对这一技术瓶颈,提出“多维度自适应协调”的设计理念,研发了适应 5 维度变位的“四连杆平动、万向架偏转”式驱动齿轮支承系统^[18-20],如图 3 所示。当塔柱相对于承船厢产生横向变位时,小齿轮托架的四连杆机构通过构件间的平动与转动复合运动实时补偿横向位移差;当齿条在竖直平面内出现相对偏斜时,由偏斜导致齿轮啮合力分布不均,驱使管轴承绕水平横向中心线转动,使齿轮啮合力回复均匀;当齿条发生水平面内的扭转变位时,其产生的不均匀啮合力驱使位移适应机构的保持架绕垂直轴线转动,同步调整齿轮姿态以匹配齿条扭转角度。这种“适应而非抵抗”的设计思路,从根本上解决了超百米塔柱变形与齿轮齿条传动精度的矛盾,已在三峡、向家坝等升船机工程中成功应用。

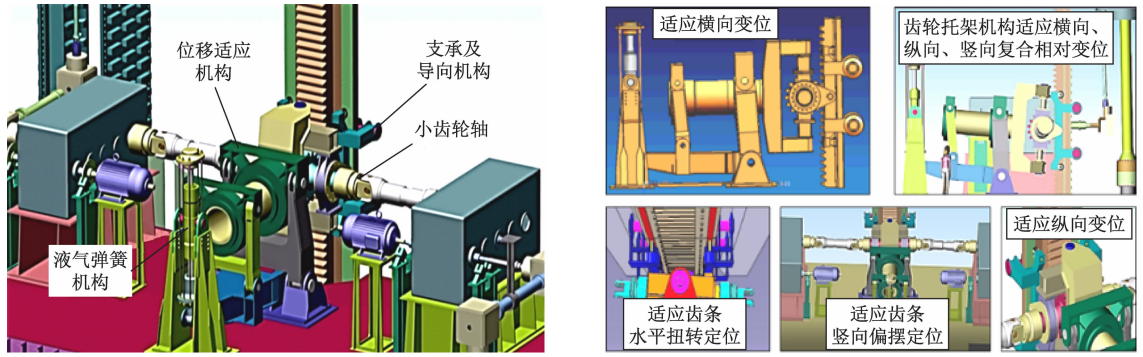


图3 驱动齿轮支承系统三维模型与变位适应原理

Fig. 3 The three-dimensional model and modification adaptation principle of the drive system

4) 螺母柱-塔柱传力新结构与分析方法

承船厢遭遇水漏空、对接沉船等特殊工况时,将产生 $4 \times 33\ 000\ \text{kN}$ 的竖向不平衡集中载荷,该载荷通过安全机构螺母柱传递至塔柱结构。针对集中载荷巨大、塔柱结构壁薄的特点,发明了“锚栓施压-凸齿灌浆-焊钉传剪”型式的螺母柱-塔柱分布式传力新结构^[21](如图4所示)。该结构沿塔柱高度方向布置,由螺母柱、调整梁、预应力钢筋、焊钉、砂浆和二期混凝土等组成。螺母柱背部与调整梁外翼缘设置相嵌钢凸齿,凸齿间隙填充砂浆,以形成连续传力体系,调整梁腹板布设数量众多的传剪焊钉并埋入二期混凝土,且每节螺母柱与调整梁均配置一定数量预应力钢筋,使各部件间保持一定的初始压力,保障螺母柱与薄壁混凝土塔柱结构间传力的可靠性。

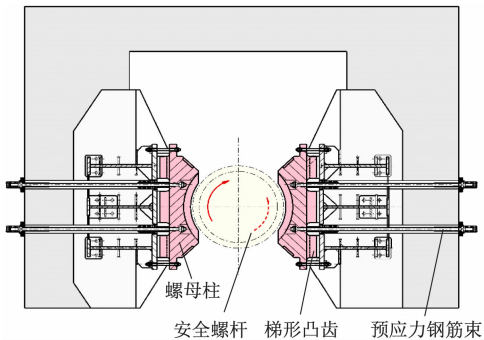


图4 螺母柱-塔柱传力新结构

Fig. 4 New force transmission structure between nut column and tower

此外,为验证该传力系统的安全性,基于其结构组成、物理特性及受力条件,建立螺母柱与调整梁内力分析的半无限长“Winkler-Pasternak”双弹性耦合地基梁模型,提出螺母柱传力系统轴向力传递的分布函数假定,基于该模型和各子结构之间轴向界面分布力假定,推导得出螺母柱和调整梁挠度、内力的计算公式及结构强度校核方法,并完成试验验证,为螺母柱传力系统的设计提供了重要的设计理论支

撑^[22-24]。其中,螺母柱挠度和调整梁挠度耦合常微分方程为

$$\begin{cases} EI_1 \frac{d^4 y_1(x)}{dx^4} + K_1(y_1(x) - y_2(x)) + \lambda^2 h_1 P e^{-\lambda x} = 0 \\ EI_2 \frac{d^4 y_2(x)}{dx^4} + (K_1 + K_2)y_2(x) - G \frac{d^2 y_2(x)}{dx^2} - K_1 y_1(x) + \lambda^2 h_2 P e^{-\lambda x} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, E 为钢材的弹性模量; I_1 和 I_2 分别为螺母柱和调整梁的面积惯性矩; K_1 和 K_2 分别为螺母柱和调整梁支承材料的弹性常量; G 为调整梁弹性基础的剪切系数; $y_1(x)$ 和 $y_2(x)$ 分别为螺母柱和调整梁的挠度沿长度的分布函数; λ 为表征轴向界面力在端面的集中分布程度的参数; h_1 为螺母柱螺牙节线至螺母柱和调整梁凸齿传力中心线的距离; h_2 为螺母柱和调整梁凸齿中心线至调整梁向二期混凝土传力界面的距离; P 为作用在单片螺母柱上的竖向载荷。

5) 抗震减震技术

齿轮齿条爬升式升船机的承船厢设备与塔柱结构耦合性强,强震作用下存在因相对水平位移过大而失效的风险。为保障升船机运行安全,设计中首次采用以船厢水平支承系统的适当刚度来抑制地震耦合力及船厢与塔柱间相对位移的设计理念,研发出集抗震减震、导引、水平锁定功能于一体的“机械弹簧组+液气弹簧”横导向装置与“弯曲梁/机械弹簧组+液压阻尼器”纵导向装置,如图5所示。

一方面,该装置通过横向与纵向导向机构将船厢和塔柱结构相连接,形成船厢相对于塔柱的水平约束,从而使船厢升降沿升船机纵、横中心线对中运行,维持船厢设备的正常工作状态;另一方面,在导

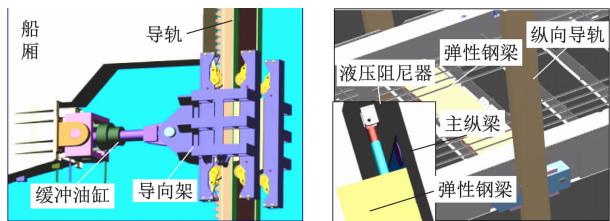


图5 抗震减震装置

Fig. 5 Seismic isolation and shock absorption device

向机构中设置机械弹簧组、液压阻尼器等弹性与阻尼元件,同时建立涵盖地基、塔柱、承船厢、水体、提升系统、平衡重系统以及导向机构的整体动力分析方法,并开展振动台物理试验,依据动力响应计算与试验成果匹配弹性系数和阻尼系数,有效降低承船厢与塔柱之间的地震耦合力60%,保障地震工况下升船机结构与设备的安全,实现了特大型升船机抗震减震技术的重大突破^[25]。

6)全平衡钢丝绳卷扬式升船机承船厢纵倾稳定性研究

全平衡钢丝绳卷扬式垂直升船机在升降运行时,承船厢为盛水容器,且采用提升钢丝绳悬吊的柔性支承形式,存在纵倾刚性运动自由度,若提升绳布置欠合理、吊点支承刚度及主提升机同步轴抗扭刚度过低,水体扰动将引发悬吊系统动态失稳,具体表现为承船厢纵向倾翻、同步轴系统产生大幅变形甚至断裂。针对该悬挂系统的稳定性难题,建立包含主提升机、承船厢和水体、平衡重系统、钢丝绳以及承船厢动态调平等要素的动力系统模型(如图6所示),揭示了厢内水体波动、失水等不均匀水动力荷载诱发承船厢倾覆的机理,提出基于液固控耦合的承船厢纵倾稳定性理论及分析方法,构建了承船厢

纵倾稳定性设计式(2),为相关规范中升船机承船厢纵倾稳定设计方法的制定提供了核心技术依据^[26-30]。

$$\begin{cases} a \geq Sa_c \\ a_c = \sqrt{\left(1 + \frac{EAR_r^2 l_r n_r}{2GIHn_a i_a^2}\right) \frac{g\rho BL^3 H}{3n_r EA}} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, S 为纵倾稳定安全系数,取值不小于2.2; a 为驱动点纵向中心距; a_c 为临界中心距; g 为重力加速度; ρ 为水体密度; B 为承船厢水域宽度; L 为承船厢水域长度; H 为提升绳的最大悬吊长度; E 为提升绳的弹性模量; A 为单根提升绳的金属横截面积; n_r 为提升绳的数量; R_r 为卷筒的名义半径; l_r 为连接单边纵向两卷扬机的同步轴总长度; I 为单根同步轴横截面的极惯性矩; n_a 为纵向同步轴个数; i_a 为同步轴与卷筒的转速比; G 为钢材的切变模量。

7)智能柔性制动技术

在升船机正常运行情况下,安全制动系统与主电气传动控制系统配合,实现升船机的正常启动和停机;当升船机主提升机或驱动系统发生断电或多台电机故障时,安全制动系统实现紧急制动。在较早的钢丝绳卷扬式升船机设计中,安全制动系统一般采用预设制动力矩的方式进行制动,一旦集控总站发出紧急制动的指令,工作制动器通过单一的集中控制泵站,按预先设定的双阶梯形制动力矩曲线实施强制制动,制动加速度较大,容易对系统造成冲击。为避免在意外停机条件下驱动机构和悬吊系统承受巨大冲击载荷,提出了驱动机构“速度反馈、多站同步、无级调压”智能柔性制动技术。

对发电工况和轻载电动工况,采用速度闭环反馈控制系统,实现紧急制动过程速度曲线的精确控制,对重载电动工况采用零速制动的柔性制动策略,在测得电机实测转速为零或已产生微小的反向速度后,工作制动器施加制动力矩,从而大幅降低紧急制动加速度。对于采用多液压站分散控制方式的主提升系统,电气控制采用分层分布式控制结构,设置传动协调站和多个泵站现地控制站,每套现地控制软件均配置1套制动运算模型,实现各自的制动分散控制,在此基础上4套制动运算模型共用一个制动速度曲线给定信号,实现升船机安全制动系统的多液压站同步均衡制动控制^[31-33]。

8)大型船舶拦阻技术

在3000t级船舶的拦防设计中,发明了“钢索拦防、油缸吸能”拦阻设备。该防撞装置安装在船厢结构上,通过钢丝绳拦防和液压缓冲吸能的技术组合,使船舶失速的拦防过程为柔性碰撞吸能过程,

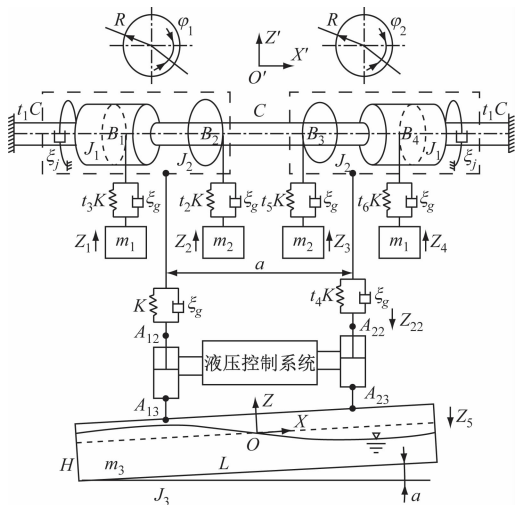


图6 承船厢纵倾稳定动力系统模型

Fig. 6 Ship chamber trim stabilization dynamic system model

最大碰撞力和缓冲行程可通过液压油缸控制系统所配置的溢流阀与工作行程控制。此外,基于船舶与防撞装置撞击过程中能量转换以及空间几何关系的分析,建立了包括船舶和钢丝绳-缓冲油缸防撞装置的两阶段二阶非线性动力学模型,提出了钢丝绳-缓冲油缸防撞装置计算方法,包括钢丝绳张力、船舶水平行进距离以及油缸缓冲行程等重要参数的设计计算和控制条件的确定,以及防撞装置安全性评估方法。其中,缓冲距离应满足如下条件^[34]:

$$\frac{\sqrt{(d_{cp} + \delta)^2 + 2L(d_{cp} + \delta)}}{2\sin\beta} < d_{gc} - \delta_h \operatorname{ctg}\beta \quad (3)$$

式(3)中, d_{cp} 为缓冲油缸的缓冲距离; δ 为发生船舶撞击后钢丝绳弹性伸长量; L 为钢丝绳支点间间距; β 为船舶船艏倾角; d_{gc} 为船舱门至拦防钢丝绳的距离; δ_h 为船舱门顶与拦防钢丝绳的垂直距离。

两阶段拦防过程行进非线性动力学方程为^[35]:

$$\begin{cases} M\ddot{w}_1(t) + \alpha\dot{w}_1(t)^2 + \frac{4p_0A_c w_1(t) \cos\beta}{l} + \frac{8E_r A_r w_1(t)^3 \sin^2\beta \cos\beta}{l^3} = 0 \\ M\ddot{w}_2(t) + \alpha\dot{w}_2(t)^2 + \frac{4p_0A_c w_2(t) \sin\beta \cos\beta}{l} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, M 为船舶总质量与附连水质量之和; α 为船舶在水中行进的阻尼系数; $\ddot{w}_1(t)$ 为 t 时刻船舶的行进加速度; $\dot{w}_1(t)$ 为 t 时刻船舶的行进速度; $w_1(t)$ 为船舶开始撞击钢丝绳之后 t 时刻船舶的缓冲距离; p_0 为缓冲油缸预紧油压; A_c 为缓冲油缸无杆腔截面面积; E_r 为钢丝绳弹性模量; A_r 为钢丝绳有效截面面积; β 为船舶倾角; l 为钢丝绳横跨船舱的长度; $w_2(t)$ 为溢流阀开启后 t 时刻的船舶缓冲距离; $\dot{w}_2(t)$ 为溢流阀开启后 t 时刻船舶的行进速度; $\ddot{w}_2(t)$ 为溢流阀开启后 t 时刻船舶的行进加速度。

为验证上述防撞装置的安全性和可靠性,首次开展了大型船舶实船拦阻试验,实现了对3 000 t失速船舶在2 m缓冲距离内成功拦防^[36]。

9) 平衡摩擦卷筒水漏空设防技术

在大型船舶超高扬程通航工程场景中,传统全平衡钢丝绳卷扬式垂直升船机受其结构体系布置空间限制,面临承船厢水漏空极端事故设防的工程难题。此类事故一旦突发,系统固有的全平衡状态将因承船厢水体流失而被打破,极易引发制动失效、设备损毁、通航中断等重大安全风险,成为制约该类型升船机向更高扬程、更大吨位应用场景突破的关键技术瓶颈。

针对这一技术挑战,结合超高扬程大型升船机的工程运行需求与安全防控目标,创造性地提出平衡摩擦卷筒水漏空设防技术^[37],构建了极端工况下的安全制动新技术路径。该技术以摩擦卷筒替代原有滑轮组,并针对性地增设事故制动器,通过与提升卷筒安全制动器形成协同联动制动机制,实现了水漏空事故工况下承船厢平稳可靠制动,从根本上解决了失衡状态下承船厢制动控制的核心难题。

为确保该技术满足超高扬程、大吨位通航的严苛安全标准,保障极端事故下设备与船舶的绝对安全,水漏空极端事故设防需严格遵循以下性能控制条件,确保制动能力、钢丝绳受力稳定性等关键指标满足要求:

$$\begin{cases} \frac{W_g(1 - e^{-2\pi\mu}) + W_1}{W_w} \geq 1.1 \\ \frac{n_a n_d R_a F_a}{W_g(1 - e^{-2\pi\mu}) R_d} \geq S \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, W_g 为重力平衡重质量; W_1 为转矩平衡重质量; W_w 为设计水深水体质量; n 为每根钢丝绳在平衡摩擦卷筒上的缠绕圈数; μ 为钢丝绳与卷筒间的摩擦系数; n_a 为单个平衡摩擦卷筒上的液压盘式制动头数量; n_d 为平衡摩擦卷筒数量; R_a 为液压盘式制动头分布圆半径; F_a 为单个液压盘式制动头的名义制动摩擦力; R_d 为卷筒名义半径; S 为制动安全系数。

2.2 施工与制造技术研究

升船机的塔柱施工与设备制造技术是保障设备安全可靠运行的核心环节,其质量直接决定升船机的结构和设备安全、运行稳定性与长期服役性能,其核心技术方向聚焦于混凝土施工、埋件安装、核心设备制造等关键技术环节,具体研究内容如下。

1) 塔柱结构施工仿真、监测及反馈分析技术

齿轮齿条爬升式升船机塔柱作为大跨度高耸混凝土结构,其施工过程面临多重技术挑战:一是变形精度控制难,塔柱浇筑阶段的结构重力会引发竖向变形,而环境温差、混凝土水化热和偏心则易诱发水平及扭转变形,多向变形叠加易偏离设计基准,直接影响齿条、螺母柱的安装精度;二是埋件安装精度要求严苛,齿条与螺母柱的啮合间隙、垂直度偏差需控制在毫米级,传统施工工艺难以满足塔柱动态变形下的高精度安装需求;三是多工序衔接风险高,混凝土浇筑、构件预埋、后期安装的跨阶段衔接中,进度推进与变形监测的不同步易导致误差累积,加剧结构与构件的位置偏差。

针对上述难题,研发了“仿真预控-实时监测-反

馈优化”的闭环施工技术体系:首先通过施工全过程仿真计算,量化塔柱在竖向荷载、温度荷载作用下的变形规律,据此优化施工程序与浇筑参数;其次在施工工期布设高精度监测系统(位移、温度传感器),实时采集塔柱变形数据;最后将监测数据反馈至仿真模型,动态修正后续施工参数,实现“仿真指导施工、监测校准仿真”的双向联动。依托该技术,最终实现了140 m高度范围内齿条、螺母柱的垂直度偏差 ≤ 5 mm的高精度控制目标^[38-39]。

2) 高硬度、大淬深、超大模数铸造齿条制造技术

三峡升船机模数62.667 mm,齿宽810 mm的超大模数铸造齿条,需满足全齿深层表面硬化、齿面硬度 $HV610 \pm 20$,工艺硬化层深度6~9 mm的严苛技术指标要求。这一指标不仅远超国内外现有制造水平,更因无任何相关经验可循,成为制约装备研发的“卡脖子”难题。其技术挑战集中体现在三方面:一是材料理化性能指标要求极高,需对铸件内部组织均匀性、夹杂物含量及气体残留量进行严格控制,无损探伤标准远超常规工业件;二是表面淬火工艺控制难度巨大,传统工艺易导致齿根部位产生裂纹,且残余应力分布不均,直接威胁齿条承载安全性;三是淬火变形与精加工矛盾突出,大尺寸构件淬火后变形量难以控制,给后续齿面精加工带来极大挑战,严重影响构件精度与使用寿命。

面对这一世界级技术难题,在工艺创新层面,首创“感应加热-压缩空气气淬+水淬”复合淬火技术,通过多物理场耦合数值模拟,精准揭示大模数齿条齿面淬火应力形成机理,构建了残余应力调控理论体系。同时开展大量齿条试件工艺试验,实时监测淬火过程中的温度场、冷却速度与残余应力变化规律,最终形成一套可量化、可复制的工艺参数体系,成功攻克大模数铸件齿条表面淬火齿根开裂这一核心难题,为同类构件制造提供了理论与工艺支撑。在装备研发层面,针对性地研制齿条表淬防变形专用工装设备,通过模块化齿条固定装置,实现齿条与工装的快速连接与拆卸,满足大批量生产需求;更关键的是,采用“对称加载、应力抵消”的设计理念,使工装上两个定位侧壁连接的齿条在表淬过程中产生的齿面变形力,通过胎本体受力部相互抵消,从根本上解决了大尺寸构件淬火变形难题。实践表明,该工装将齿条表淬变形量从传统工艺的6 mm降至2 mm以内,不仅实现了变形量的精准控制,更确保了淬硬层深度的稳定性,显著提升表淬效率,为后续齿面精加工奠定了坚实基础,保障了三峡升船

机核心部件的制造精度与可靠性^[40-41]。

3) 安全机构分体式超大螺距螺母柱制造技术

三峡升船机超大螺距螺母柱的制造、装配与检测技术难点,主要体现在两个方面:一是高精度空间曲面加工的技术难题,螺纹齿形为大导程螺旋面,牙面属于复杂空间异形曲面,传统加工设备与工艺难以实现曲面轮廓的高精度成型;二是装配与检测的挑战,超大型构件的现场装配精度要求极高,且大空间异形曲面的测量与建模缺乏成熟技术方案。

面对上述难题,研创了“分体瓦片加工、成对组装、空间共面测量”的超大螺距分体螺母柱制造、加工、装配和检测技术。将整体式构件分解为若干瓦片式单元进行加工,通过优化切削参数、创新刀具路径规划,成功实现空间螺旋面的高精度成型;建立大型分体式螺母柱共面度检测方法,一是通过布设高精度测量基准,结合激光跟踪仪与三坐标测量机的协同测量,实现对分体构件组装后空间共面度的精准量化评估;二是创新卧式试装方法,模拟实际工况搭建卧式装配平台,提前发现并解决装配过程中的尺寸干涉与精度偏差问题,大幅提升现场装配效率与可靠性;三是开发大型空间自由曲面测量与建模技术,通过点云数据采集、曲面重构与精度分析,实现对复杂异形曲面的全尺寸检测与数字化建模,为加工工艺优化与装配精度控制提供数据支撑。通过这一系列技术创新,最终实现了螺距450 mm、中径1450 mm分体螺母柱空间螺旋面共面度偏差小于0.5 mm的超高精度要求,成功攻克升船机超大型螺母柱异形空间曲面高精度制造这一世界级难题^[42-43]。

4) 巨型船厢智能建造技术

作为船舶的核心载体,承船厢主体尺寸巨大(如三峡升船机长132 m,宽24.1 m,高11.5 m),整体重量数千吨,不仅需承载船舶质量,更集成了各种机械设备,结构复杂,安装精度要求高。其核心技术难点主要体现在:分块制造与整体拼装的精度控制难,现场狭小空间拼装施工难度高,环境温度干扰性强,以及焊接变形控制难。

针对上述难题,构建了巨型承船厢智能建造技术体系^[44]。创新开发船厢建造智能仿真系统,合理分段,并仿真模拟数十个分段从厂内制造、运输到现场拼装的全流程,精准控制尺寸偏差风险;提出大结构焊接变形控制新工艺,基于不同环境温度、焊缝位置、焊接参数的仿真分析,优化焊缝尺寸与剖口、焊接顺序和热输入量,实现焊接变形的“事前预控”;在装配中创新性地引入对接精度实时监测系统,数

据同步传输至智能仿真系统,通过系统计算动态调整拼装位置,最终实现多分块、超大型船厢结构现场总体拼装偏差毫米级的精度控制目标。

3 升船机技术发展趋势

金沙江下游(攀枝花-宜宾段)依托乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝4座水电站形成了768公里深水航道,具备通航3 000~5 000 t级船舶的条件,但当前仅向家坝枢纽建有1 000 t级升船机,其余枢纽无通航设施,呈现“藕节式肠梗阻”的分段通航状态。2023年向家坝区段货运量已突破1 000万t,现有升船机过坝能力不足导致船舶压港、货物转运堵塞问题突出。为贯通金沙江下游航道、实现长江黄金水道“延上游”的目标,规划提出为4座枢纽增设通航建筑物,设计过船规模达5 000 t级、提升高度超200 m,这对升船机的超大型化的适配能力和超高扬程的适应性提出了刚性需求,同时需通过智能化技术保障设备在复杂工况下的安全高效运行。

3.1 串并联矩阵式升船机布置方案

金沙江下游高坝枢纽面临“五高一”的通航挑战——高水位变幅、高水位变率、高通航吨位、高地震烈度以及大提升高度,采用传统单线升船机难以满足运量要求,更在超大载荷装备研发、极限工况安全控制等核心环节面临难以突破的技术瓶颈。基于此,长江勘测规划设计研究有限责任公司升船机研究团队提出串联多线矩阵式升船机布置方案^[45],其核心是通过“串联降规模+并联提效率”的复合布局,实现技术可行性与通航效能的平衡:1)串联降维——拆分单套设备规模,将2座技术参数完全一致的垂直升船机沿通航轴线串联布置,每座升船机的承船厢一端对接上/下闸首,另一端可通过间隙密封实现两座承船厢的水域互接。该设计将单套升船机的承载规模从 $2 \times 3\ 000 \sim 5\ 000$ t级,拆解为两套 $3\ 000 \sim 5\ 000$ t级,大幅降低了单套设备的设计、制造与安装难度;2)并联扩容——提升通航通过能力,在串联单元的基础上,采用双线并联的矩阵式布局,可支持单承船厢独立运行、双承船厢串联运行,或多承船厢并行作业。相较传统单线升船机,该方案可弥补升船机“运量低于船闸”的固有短板,匹配金沙江下游亿吨级货运需求。该方案布置如图7所示。

串联矩阵式方案在理论层面与金沙江下游通航需求高度契合,是顺应升船机超大型化趋势的创新布局。该方案立足于我国于已建大型升船机工程的

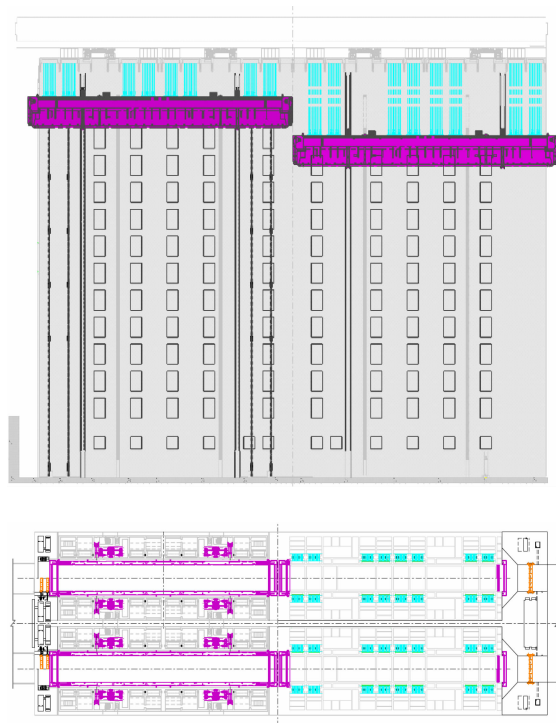


图7 串联多线矩阵式升船机布置方案

Fig. 7 Layout plan of shiplift with tandem multi-line matrix type

成熟技术积淀与工程实践经验,创新采用矩阵式多线串联的系统构型,实现了在不突破单机设备制造极限的前提下,通航建筑物通过能力的量级跃升。从技术可行性维度研判,该方案目前未显现难以逾越的基础性技术瓶颈;但面向工程化落地的实践,仍需聚焦多线设备协同调度策略、多单元复合系统控制、动态对接密封关键技术等核心方向,开展更深层次的理论攻关与试验验证。

3.2 摩擦驱动式升船机

钢丝绳卷扬式垂直升船机相较于齿轮齿条爬升式,具有建设成本低,设备简单,主提升机设备维护检修条件好的优点。但在面对大型船舶翻越超高大坝的通航条件时,存在主提升机布置困难、承船厢纵倾稳定性低、承船厢水漏空的事故设防难以实现等问题。针对上述问题,提出了全平衡摩擦驱动式垂直升船机这种新型式升船机^[46]。该型式升船机的基本特点在于,以摩擦提升机代替传动的卷扬机,显著缩短了钢丝绳在卷筒上缠绕所占据的轴向长度,从而使卷扬机数量减半;以可控摩擦卷筒代替传统的平衡滑轮组,并增设事故制动器以增强升船机在承船厢水漏空事故时的制动能力;通过安全制动器、事故制动器和承船厢沿程锁定机构的联合作用,解决水漏空事故条件下承船厢的制动问题。

该新型升船机能大幅度拓宽钢丝绳卷扬式垂直

升船机的应用场景,但目前未有建成案例,仍需从以下几个方面进行深入研究。

1) 水漏空事故工况钢丝绳-卷筒力学动态过程研究

水漏空事故过程中钢丝绳张力的动态变化会影响钢丝绳与卷筒之间的摩擦力及相对运动状态,而如何描述钢丝绳-卷筒的力学动态过程,直接关系到摩擦制动的安全机制。因此该过程研究,可为应对船厢水漏空等突发状况,确保该型式升船机系统安全可靠运行提供理论基础。

2) 承船厢刚度对钢丝绳张力变化的影响规律

当摩擦卷筒的安全制动器上闸制动后,承船厢、提升绳、重力平衡绳构成的超静定系统需满足变形协调。此情况下,提升绳和重力平衡绳张力分配受变形协调条件制约,可能导致卷筒绳槽与钢丝绳间的静摩擦条件遭受破坏,进而产生滑动,并重新分配提升绳、平衡绳张力。因此,需研究承船厢变形对钢丝绳张力变化的影响,确保升船机在极端事故工况下的安全可靠。

3) 超大直径钢丝绳与卷筒的制造、运输与安装技术

对于 200 m 级超高扬程、5 000 t 级通航规模的摩擦驱动式升船机,钢丝绳直径达 108 mm,卷筒直径达 6 500 mm,超过现有已建或在建工程。故大直径卷筒的铸造、焊接工艺及热处理技术、高强度钢丝绳的性能保障、超大尺寸构件的运输安装方案等需进行专项技术攻关。

3.3 在线监测与故障诊断

在升船机智能状态监测领域,三峡升船机齿轮齿条设备的监测探索率先实现从“理论构想”到“试验验证”的突破——通过搭建三峡升船机齿轮齿条小比例物理模型,系统模拟良好润滑、不良润滑、良好润滑+点蚀、良好润滑+点蚀+裂纹四类典型工况,创新采用同步压缩小波变换和 1~3 倍频切片技术,捕捉并提炼齿轮齿条三种故障的数据信号特征,实现了故障状态的有效识别和特征获取^[47];验证了基于门控循环神经网络的故障识别方法对齿轮齿条故障诊断的有效性;并以小比尺物理试验模型成果为基础,提出了三峡升船机齿轮齿条现场状态监测的实施方案,为超大型升船机核心传动系统健康管理提供关键技术支撑。

随着升船机向超大型化、复杂化发展,构建“全生命周期智能监测诊断体系”成为行业技术升级的核心方向,其技术框架与发展趋势需要三大维度突破。

1) 多维度监测感知系统

基于“全域覆盖、精准感知”理念,构建监测网络,包括塔柱、承船厢主梁、螺母柱等关键结构的健康监测和齿轮齿条传动系统、钢丝绳卷扬系统等核心设备的状态监测。

2) 数据融合与智能诊断技术

针对监测数据多源、异构、海量的特点,突破“数据-特征-故障”三级融合诊断技术,包括对数据进行预处理,通过时域、频域分析,提取结构与设备的故障特征指标,并融合深度学习与知识图谱技术,构建故障诊断模型,实现早期微弱故障识别、故障原因追溯与定位。

3) 预警与运维决策支持系统

基于监测诊断结果,构建“分级预警-智能决策-闭环运维”体系:①分级预警机制,根据故障严重程度与发展趋势,设定预警阈值,实时推送预警信息;②智能决策支持,结合设备剩余寿命预测模型与运维资源调度算法,自动生成运维方案;③数字孪生联动,将监测数据与升船机数字孪生模型实时映射,可视化展示结构变形、设备状态与故障位置,支持虚拟仿真测试,为运维决策提供直观参考。

4 结论

本文系统梳理了升船机技术发展历程、体系架构与核心突破,结合工程实践预判未来趋势,得出以下结论。

1) 技术演进实现跨越式发展:升船机技术从工业革命时期的机械化斜面式,逐步发展为现代平衡重式垂直升船机,中国仅用二十余年便完成从“引进吸收”到“自主创新”的跨越,构建起齿轮齿条爬升式、钢丝绳卷扬式、水力驱动式三大技术体系,建成三峡、构皮滩等世界级升船机集群,确立全球技术领先地位。

2) 核心技术突破攻克系列瓶颈。结构设计领域,突破百米级高扬程单级、200 m 级超高扬程组合式升船机结构体系,解决变形协调、结构传力、抗震减震、纵倾稳定、柔性制动、船舶拦阻、水漏空设防等安全保障技术难题,从理论方法、结构设计到设备研发实现全方位创新。施工制造领域,构建“仿真预控-实时监测-反馈优化”的闭环技术体系,通过工艺创新、工装研发与智能技术应用,攻克超大模数齿条、超大螺距分体螺母柱、巨型承船厢等核心部件的高精度制造安装难题,实现毫米级精度控制。智能监测领域,首次建立齿轮齿条设备多维度感知、数据融合诊断技术,推动升船机运维向智能化转型,为设

备安全高效运行提供保障,上述突破形成了适用于重大装备设计施工制造的技术范式,为我国水利工程领域的技术升级提供了关键支撑。

3) 未来趋势聚焦超大型化与智能化:金沙江下游通航需求推动升船机向5 000 t级、200 m级提升高度发展,串联矩阵式布置方案与摩擦驱动式机型成为重要探索方向,需突破多线设备协同调度策略、多单元复合系统控制、动态对接密封等关键技术瓶颈。同时,在线监测与故障诊断技术将进一步深化,结合数字孪生、人工智能实现全生命周期智能运维,提升设备可靠性与经济性。

4) 战略价值支撑国家重大需求:升船机技术的突破不仅补齐内河航运基础设施短板,推动长江黄金水道“延上游”与金沙江下游航道贯通,更为实现“双碳”目标提供绿色航运装备支撑。其形成的技术范式与工程经验,可推广至共建“一带一路”国家水利枢纽通航工程,助力全球内河航运技术升级,彰显中国高端装备制造的核心竞争力。

未来需持续加强升船机超大型化、智能化关键技术研发,完善标准体系,推动技术成果产业化应用,为我国内河航运高质量发展与国家综合立体交通网建设提供更坚实的技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 钮新强,宋维邦. 船闸与升船机设计[M]. 北京,中国水利水电出版社,2007.
Niu X Q, Song W B. Design of locks and shiplifts [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. (in Chinese)
- [2] 钮新强,童迪,吴俊东,等. 高坝通航建筑物设计与研究[M]. 武汉:长江出版社,2022.
Niu X Q, Tong D, Wu J D, et al. Design and research of navigation structures for high dams [M]. Wuhan: Yangtze River Press, 2022. (in Chinese)
- [3] PIANC. Innovation in shiplift navigation concepts [R]. Brussels, Belgium: PIANC, 2023.
- [4] 钮新强等. 大型齿轮齿条爬升式升船机 [M]. 北京:科学出版社,2021:9-16.
Niu X Q, et al. Large scale rack and pinion vertical shiplifts [M]. Beijing: Science Press, 2021: 9-16. (in Chinese)
- [5] 钮新强,覃利明,于庆奎. 三峡工程齿轮齿条爬升式升船机设计[J]. 中国工程科学,2011,13(7):96-103.
Niu X Q, Qin L M, Yu Q K. Design of rack-and-pinion climbing shiplift for the Three Gorges Project [J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2011, 13(7): 96-103. (in Chinese)
- [6] Liao L K, Zhu H, Zhang R. Research and design of the main equipment and structure of Xiangjiaba shiplift [J]. Engineering, 2014, 12(5): 81-89.
- [7] 廖乐康,于庆奎,吴小宁. 钢丝绳卷扬垂直升船机设备布置设计与研究[J]. 人民长江,2009,40(23):61-64.
Liao L K, Yu Q K, Wu X N. Design and research on equipment layout for vertical ship hoist with wire rope winch [J]. People's Yangtze River, 2009, 40(23): 61-64. (in Chinese)
- [8] 余友安,廖乐康,金辽. 构皮滩垂直升船机金属结构和机械设备设计研究[J]. 人民长江,2019,50(5):119-125.
Yu Y A, Liao L K, Jin L. Design research on the metal structure and mechanical equipment of the vertical shiplift at Goupitan project [J]. People's Yangtze River, 2019, 50(5): 119-125. (in Chinese)
- [9] 胡亚安,马洪琪,李中华. 水力式升船机水力学应用基础研究[M]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
Hu Y A, Ma H Q, Li Z H. Fundamental research on hydraulic applications of shiplifts [M]. Beijing: People's Communications Press Co., Ltd., 2017. (in Chinese)
- [10] 刘金堂,曹以南,凌云,等. 景洪水力式升船机设计研究[J]. 水力发电,2008,(4):43-45.
Liu J T, Cao Y N, Lin Y, et al. Design research on Jing Hong hydraulic shiplift [J]. Hydropower Generation, 2008, (4): 43-45. (in Chinese)
- [11] 汪基伟,钮新强,杨本新. 三峡升船机上闸首结构配筋方案研究[J]. 人民长江,2001,32(11):8-10.
Wang J W, Niu X Q, Yang B X. Study on reinforcement design for the upper chamber structure of the Three Gorges Shiplift [J]. People's Yangtze River, 2001, 32(11): 8-10. (in Chinese)
- [12] 钱向东,傅作新,钮新强,等. 三峡升船机上闸首基岩的整体稳定性研究[J]. 岩土力学,2000,21(3):213-216.
Qian X D, Fu Z X, Niu X Q, et al. Study on the overall stability of the bedrock at the upper gate of the Three Gorges Shiplift [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 213-216. (in Chinese)
- [13] 王可,王蒂. 三峡升船机下沉工作大门充压止水应用研究[J]. 人民长江,2014,45(5):28-30.
Wang K, Wang D. Application research on pressure sealing of the service gate during the sinking process of the Three Gorges Shiplift [J]. People's Yangtze River, 2014, 45(5): 28-30. (in Chinese)
- [14] 杨红,俞歌,杨化,等. 三峡升船机下闸首工作大门安装关键技术应用[J]. 人民长江,2018(s1):118-120.
Yang H, Yu G, Yang H, et al. Application of key technologies in Installing the service gate of the lower lock chamber at the Three Gorges Shiplift [J]. People's Yangtze River, 2018(s1): 118-120. (in Chinese)
- [15] 朱俊杰,李士华. 三峡升船机塔柱横梁支撑系统设计

- [J]. 中国工程科学,2013(9):64-69.
- Zhu J J, Li S H. Design of the tower column crossbeam support system for the Three Gorges Shiplift [J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2013(9):64-69. (in Chinese)
- [16] 苏海东,谢小玲,祁勇峰. 三峡升船机塔柱联系梁三维有限元内力计算[J]. 长江科学院院报,2009,26(1):38-41.
- Su H D, Xie X L, Qi Y F. Three-dimensional finite element internal force calculation for the connecting beam of the Three Gorges Shiplift tower columns [J]. Bulletin of the Yangtze River Scientific Research Institute, 2009,26(1):38-41. (in Chinese)
- [17] 路万锋,吴俊东,王贵来,等. 构皮滩水电站通航建筑物第一级升船机形式与布置[J]. 水运工程,2023(8):109-113.
- Lu W F, Wu J D, Wang G L, et al. Design and layout of the first-level shiplift for the navigation structures at Goupitan Hydropower Station [J]. Water Transport Engineering, 2023(8):109-113. (in Chinese)
- [18] 杨逢尧,于庆奎. 三峡升船机金属结构与机械设备的的关键技术问题[J]. 人民长江,1997,28(10):33-35.
- Yang F Y, Yu Q K. Key technical issues concerning the metal structures and mechanical equipment of the Three Gorges Shiplift [J]. People's Yangtze River, 1997,28(10):33-35. (in Chinese)
- [19] 廖乐康. 升船机液气弹簧装置设计与研究[J]. 人民长江,2021,52(12):133-139.
- Liao L K. Design and research of hydropneumatic spring devices for shiplifts [J]. People's Yangtze River, 2021,52(12):133-139. (in Chinese)
- [20] 中国长江三峡集团公司. 升船机小齿轮托架系统: CN204647228U[P],2015-09-16.
- China Three Gorges Corporation. Shiplift pinion bracket system; CN204647228U [P], 16 September 2015. (in Chinese)
- [21] 中国长江三峡集团公司. 一种升船机螺母柱与塔柱混凝土结构的连接型式: CN204662406U[P],2015-09-23.
- China Three Gorges Corporation. A connection configuration for a shiplift nut column and tower column concrete structure; CN204662406U [P], 23 September 2015. (in Chinese)
- [22] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 一种升船机螺母柱传力系统的内力计算和强度校核方法: CN116910922A[P],2023-10-20.
- Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd. A method for calculating internal forces and strength verification of a nut stud load transfer system for a shiplift; CN116910922A [P], 20 October 2023.
- [23] 王蒂,廖乐康,金辽. 升船机螺母柱传力系统内力解析及案例分析[J]. 长江科学院院报, 2025,42(8):144-152.
- Wang D, Liao L K, Jin L. Analysis of internal forces in the nut column force transmission system of a shiplift and case study [J]. Journal of the Yangtze River Scientific Research Institute, 2025,42(8):144-152. (in Chinese)
- [24] Liao L K. A sandwich-type winkler-Pasternak double elastic foundation beam model for analysis of nut column load transfer systems of shiplifts [J]. Mathematical Models in Engineering, 2024,10(4):264-280.
- [25] 高建勇. 大型升船机塔柱结构动力模型试验研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2013.
- Gao J Y. Experimental study on the dynamic model of tower structures for large-scale shiplift [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013. (in Chinese)
- [26] Zhang Y, Shi D W, Liao L K, et al. Pitch stability analysis of high-lift wire rope hoist vertical shiplift under shallow water sloshing-structure interaction [J]. Institute of Mechanical Engineering, 2019, 233(4):942-955.
- [27] Cheng X H, Shi D W, Li H X, et al. Stability and parameters influence study of fully balanced hoist vertical shiplift [J]. Struct. Eng. Mech, 2018,66:583-594.
- [28] Zhang Y, Shi D W, Xiao T, et al. Pitch stability analysis for mechanical-hydraulic-structure-fluid coupling system of high-lift hoist vertical shiplift [J]. Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2020, 66(4):266-275.
- [29] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 利用微分方程特征值判断承船厢纵向倾覆稳定性的方法: CN202310395005.8[P],2023-06-23.
- Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd. Method for assessing longitudinal capsizing stability of shiplift chamber using eigenvalues of differential equations; CN202310395005.8 [P], 23 June 2023. (in Chinese)
- [30] 升船机设计规范:GB 51177—2016[S],2016.
- Design code for shiplifts; GB 51177—2016 [S], 2016.
- [31] 张莉,廖乐康. 全平衡垂直升船机紧急制动力曲线研究[J]. 人民长江, 2015,46(9):1-4.
- Zhang L, Liao L K. Research on emergency braking force curves for fully balanced vertical shiplifts [J]. People's Yangtze River, 2015, 46(9):1-4. (in Chinese)
- [32] 廖乐康,唐勇. 升船机多液压站柔性智能制动技术[J]. 人民长江,2020,51(8):151-157.
- Liao L K, Tang Y. Flexible intelligent braking technology for shiplifts with multiple hydraulic stations [J]. People's Yangtze River, 2020,51(8):151-157. (in Chinese)
- [33] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 一种升船机智能控制安全制动系统及其安全制动方法: CN201811521567.8[P],2023-10-27.

- Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd. An intelligent control safety braking system for shiplifts and its safety braking method; CN201811521567.8 [P], 27 October 2023. (in Chinese)
- [34] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 升船机钢丝绳-缓冲油缸防撞装置设计计算方法: CN202310493431.5 [P], 2023-07-11.
Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd. Design calculation method for wire rope-buffer cylinder collision protection device in shiplift; CN202310493431.5 [P], 11 July 2023. (in Chinese)
- [35] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 升船机钢丝绳-缓冲油缸防撞吸能装置的动力学计算方法: CN202310710735.2 [P], 2023-08-22.
Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd. Dynamic calculation method for the wire rope-buffer cylinder energy-absorbing collision protection device in shiplift; CN202310710735.2 [P], 22 August 2023. (in Chinese)
- [36] 王新, 胡亚安. 向家坝升船机船厢防撞系统实船撞击试验[J]. 水力发电学报, 2019, 38(1): 12-19.
Wang X, Hu Y A. Full-scale impact test of the collision protection system for the ship lock chamber of Xiangjiaba Shiplift [J]. Journal of Hydropower Engineering, 2019, 38(1): 12-19. (in Chinese)
- [37] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 一种适合重载高扬程应用的全平衡摩擦驱动式垂直升船机: CN201910374131.9 [P], 2024-05-03.
Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd. A fully balanced friction-driven vertical shiplift suitable for heavy-load, high-head Applications; CN201910374131.9 [P], 3 May 2024. (in Chinese)
- [38] 陕亮, 崔建华, 苏海东. 三峡升船机塔柱结构施工期仿真计算分析[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(7): 118-124.
Shan L, Cui J H, Su H D. Simulation analysis of the construction period for the tower structure of the Three Gorges Shiplift [J]. Bulletin of the Yangtze River Research Institute, 2019, 36(7): 118-124. (in Chinese)
- [39] 邱章云, 罗琛. 三峡升船机塔柱施工期变形监测[J]. 中国工程科学, 2013(9): 102-107.
Qiu Z Y, Luo C. Deformation Monitoring of the Tower Columns During Construction of the Three Gorges Shiplift [J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2013(9): 102-107. (in Chinese)
- [40] 二重集团(德阳)重型装备股份有限公司. 模数在 50 mm ≤ m ≤ 150 mm 的重载齿条的中频感应淬火工艺: CN201310693560.5 [P], 2016-02-17.
Erzhong Group (Deyang) Heavy Equipment Co., Ltd. Medium-frequency induction hardening process for heavy-duty racks with module ranging from 50 mm ≤ m ≤ 150 mm; CN201310693560.5 [P], 17 February 2016. (in Chinese)
- [41] 曹毅, 王可, 李伟雄, 等. 三峡升船机齿条模型试验及状态监测方案研究[J]. 水利水运工程学报, 2024(1): 156-163.
Cao Y, Wang K, Li W X, et al. Research on rack model testing and condition monitoring scheme for the Three Gorges Shiplift [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024(1): 156-163. (in Chinese)
- [42] 中国长江三峡集团公司. 高扬程齿爬式升船机螺母柱系统施工方法及安装精度控制方法: CN201610129328.2 [P], 2017-07-14.
China Three Gorges Corporation. Construction method and installation accuracy control method for nut column systems in high-head toothed climbing shiplifts; CN201610129328.2 [P], 14 July 2017. (in Chinese)
- [43] 魏艳, 彭翰林, 林凡. 三峡升船机齿条-螺母柱安装精度控制措施[J]. 中国工程科学, 2013, (9): 91-96.
Wei Y, Peng H L, Lin F. Control Measures for Installation Accuracy of Rack and Nut Bolts in the Three Gorges Shiplift [J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2013, (9): 91-96. (in Chinese)
- [44] 艾志, 丁佩良, 顾心愉, 等. 长江三峡水利枢纽垂直升船机承船厢制造安装方案的研讨[C]//2011 全国钢结构学术年会论文集, 2011: 369-385.
Ai Z, Ding P L, Gu X Y, et al. Research on the manufacturing and installation plan for the ship lock chamber of the vertical shiplift at the Three Gorges Water Conservancy Project on the Yangtze River [C] // Proceedings of the 2011 National Conference on Steel Structures, 2011: 369-385. (in Chinese)
- [45] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 一种高扬程矩阵式齿轮齿条升船机通航设施: CN202411148747.1 [P], 2025-09-23.
Yangtze River Survey, Planning and Design Research Co., Ltd. A high-lift matrix-type rack-and-pinion shiplift navigation facility; CN202411148747.1 [P], 23 September 2025. (in Chinese)
- [46] Liao L K, Niu X Q, Wang D. Research on full balance friction hoist shiplifts [J]. SCIREA Journal of Mechanical Engineering, 2023, 4(1): 21-38.
- [47] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 一种齿轮齿条驱动机构故障特征信号识别方法及装置: CN202310694006.2 [P], 2024-01-05.
Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd. A method and apparatus for identifying fault feature signals in a rack and pinion drive mechanism; CN202310694006.2 [P], 5 January 2024. (in Chinese)